

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20365

研究課題名（和文）脳神経系が行う時空間情報処理に関する理論研究

研究課題名（英文）Theoretical research on spatiotemporal information processing in the brain

研究代表者

寺田 裕 (Terada, Yu)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・客員共同研究員

研究者番号：40815338

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、神経活動データから神経細胞間の結合を推定する手法に関する研究と神経回路網の数理モデルを用いた研究を行った。まず、平均場理論や情報理論に基づく手法を応用することで効率的な結合推定手法を開発した。そして、提案した推定手法をスパイクデータに適用することで背後にあるシナプス結合が正確に推定されることを確認した。次に、リズム的な神経活動に対する解析として結合位相振動子モデルを解析した。特に、線形応答理論を構築し、逆問題への応用を考えた。最後に、リカレントニューラルネットワークを使った研究では、学習の結果得られるカオス的な神経活動が確率分布の表現に有用であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案した結合推定手法は現状得られているデータだけでなく今後得られるよりサイズの大きいデータに対しても適用が期待される。神経回路網のモデルは神経科学の問題だけでなく、機械学習やAIといった関連分野への波及効果も期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we develop statistical inference methods for reconstructing neuronal couplings from spiking data and study theoretical/computational models for neural dynamics and computations. Our methods were shown to exhibit high accuracy and efficiency in inferring synaptic couplings. We also built a linear response theory in coupled oscillators to study the properties of macroscopic and mesoscopic activity in the brain. We applied the theory to develop an inference method in coupled oscillators. Finally, we study the computational roles of deterministic activity in neural networks and demonstrated that the chaotic neural activity may serve as a neural substrate for representations of probability distributions.

研究分野：理論神経科学

キーワード：リカレントニューラルネットワーク 神経データ 結合推定 非線形動力学 カオス

1. 研究開始当初の背景

近年多電極アレイ・2光子イメージングに代表される実験技術が進展することにより、多数の神経細胞の活動が同時に計測され、それらのデータから脳神経系が行う情報処理メカニズムの理解が進みつつある。特に、結合ネットワークの側面から結合神経系を捉えることで、感覚系などの情報処理の時間スケールや集団符号化の理解をすることができ始めつつある。数理的な結合ネットワークからの理解は視覚系や小脳において進んでいるが、高次の機能に関しては非常に理想化された場合を除いて理解が不十分である。そこで、神経データからの結合推定手法の開発およびそれらの手法の神経データへの適用とリカレントニューラルネットワークを用いた研究を行うことで、脳神経系が行っている情報処理メカニズムの理解を進展させることを目指した。

2. 研究の目的

本研究は観測データから背後のモデルパラメータを推定する逆問題的解析とモデル解析によって神経回路網のダイナミクス・情報処理機構を調べる順問題的解析に分かれる。逆問題的解析においては、多数の神経細胞の活動に関する非常に大きいデータから、現実的な計算リソースによって背後にある神経細胞間の結合を効率的かつ正確に推定する手法を開発することを目指した。順問題的解析においては、脳神経系が示す複雑なダイナミクスが情報処理においてどのような計算的役割を持つのかを明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

(1) スパイクデータから結合を推定する手法の構築

観測されたスパイクデータから神経細胞間のシナプス結合を推定するための手法を非対称結合をもつ動的 Ising モデルを使い、平均場理論を適用することで発展させた。特に、多くの既存研究の問題点であった 時系列データを時間離散化する際のピン幅の決定、推定された結合パラメータの推定値から統計的に有意な結合を選出する過程、における恣意性を排除するために、それぞれ情報理論と計算統計的なアイデアに基づき、推定手法を発展させた。

上記手法をニューロンモデルによって数値的に生成されたデータと培養された皮質ニューロンから得られた発火データに適用し、背後にある結合が正確に推定できているのかを調べた。

(2) リズミ的なダイナミクスを持つ結合系の理論解析と逆問題への適用

神経細胞のようにリズムを持つ素子が複数存在し互いに相互作用する系を一般的に数理モデルとして扱うと高次元力学系によって記述される。しかし、多くの場合そのような高次元力学系は自由度の多さから理論・数値解析が事実上困難になる。そこで、位相縮約理論を用いることによって、本質的な自由度である位相に着目し、高自由度力学系の広いクラスを 1 自由度のみの扱いやすい位相振動子系へと縮約することが可能となる。本研究はメソスコピック・マクロスコピックな脳神経系のリズミ的なダイナミクスの性質を調べるために、位相縮約理論に基づき位相振動子系を解析した。特に、微小な

外力に対するリズム的な特性の応答を調べるための線形応答理論を構築した。さらに、その構築された線形応答理論の結果を応用し系の内部パラメータを推定する手法の開発を試みた。

(3)カオス的な神経活動ダイナミクスの計算論的役割

神経科学において、実験で広く観測されている神経活動のゆらぎの発生メカニズムやその計算的意義はよくわかっていなかった。本研究はリカレントニューラルネットワークモデルを用いて手がかり統合タスクを解かせることで神経活動のゆらぎをもたらすカオス的なダイナミクスと不確実性の情報処理の関係を調べた。

4. 研究成果

(1)スパイクデータから結合を推定する手法の構築

仮説検定を行い、情報理論的手法を適用することで、推定を行う際の最適な時間ビンの大きさを客観的な統計量基準に従い求めることが可能になった。また、計算統計的手法を用いて、大数の法則を適用することで、統計モデルにより推定された結合の中から統計的に有意な結合のみを選択するための比較用ランダムデータを用いる計算統計的手法を提案し、基準値を準解析的に求めるための公式を導出した。

上記の手法をニューロンモデルによって生成された数値データと培養された皮質ニューロンから得られた発火データに適用し、実際の神経細胞間のシナプス結合を興奮・抑制性の区別をして非常に高い精度で再構築できることを示した。多くの状況においてシナプス結合の構造は未知であるが、本研究で用いた培養系では物理的結合の構造に関する制約が既知であり、推定結果がそのネットワーク構造をうまく再現していることを確認したため、本手法が発火データから実際のシナプス結合を推定できることが示された。

(2)リズム的なダイナミクスを持つ結合系の理論解析と逆問題への適用

位相振動子系に対して微小な外力を与え、対応するオーダーパラメータの応答を考えることで、線形応答理論を構築した。また線形応答理論の結果を用いて、観測されたマクロな変数から系のミクロな内部パラメータを同定することが可能であることを示した。

(3)カオス的な神経活動ダイナミクスの計算論的役割

リカレントニューラルネットワークにおいて、生物学的に妥当なシナプスの学習の結果、実験で観測されるような神経活動のゆらぎが生まれることを示した。そして、そのカオス的な神経活動がサンプリングを通じて確率計算に役立つことを示した。この研究結果は、神経回路網における活動のゆらぎがベイズ計算と呼ばれる不確実性を処理するためのメカニズムの基盤となっている可能性を示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Terada Yu, Obuchi Tomoyuki, Isomura Takuya, Kabashima Yoshiyuki	4. 巻 32
2. 論文標題 Inferring Neuronal Couplings From Spiking Data Using a Systematic Procedure With a Statistical Criterion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neural Computation	6. 最初と最後の頁 2187 ~ 2211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1162/neco_a_01324	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Terada Yu, Obuchi Tomoyuki, Isomura Takuya, Kabashima Yoshiyuki	4. 巻 2019
2. 論文標題 Objective and efficient inference for couplings in neuronal network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment	6. 最初と最後の頁 124010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-5468/ab3219	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Terada Yu, Yamaguchi Yoshiyuki Y	4. 巻 53
2. 論文標題 Linear response theory for coupled phase oscillators with general coupling functions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	6. 最初と最後の頁 44001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab5eaf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 寺田裕
2. 発表標題 多点同時計測データからの結合の統計的推定法と神経データへの適用
3. 学会等名 第13回 数理モデリング研究会 on Zoom: Workshop on multitrack event-trains in neural, social, seismological, and financial data (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉崎 嵐, 寺田 裕, 小淵 智之, 樺島 祥介
2. 発表標題 ニューラルネットにおける短期記憶の1ビット圧縮センシングによる想起
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺田 裕, 豊泉 太郎
2. 発表標題 決定論的な神経ゆらぎを用いて確率的計算を行う神経回路網モデル
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺田裕, 豊泉太郎
2. 発表標題 内部ダイナミクスを探索に用いて学習を行うリカレントニューラルネットワーク
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Terada Yu, Obuchi Tomoyuki, Isomura Takuya, Kabashima Yoshiyuki
2. 発表標題 Objective and efficient inference for couplings in neuronal networks
3. 学会等名 Statistical Physics and Neural Computation (SPNC-2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Terada Yu, Obuchi Tomoyuki, Isomura Takuya, Kabashima Yoshiyuki
2. 発表標題 Objective and efficient inference for couplings in neuronal networks
3. 学会等名 40 years of Replica Symmetry Breaking (RSB40) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------